

На правах рукописи



Завершинский Дмитрий Игоревич

**Теоретическое исследование магнитогазодинамических структур в  
изоэнтропически неустойчивых тепловыделяющих средах**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Казань – 2016

Работа выполнена на кафедре физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Молевич Нонна Евгеньевна**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий отделом ФГБУН  
«Институт космических исследований РАН»  
**Ерохин Николай Сергеевич**

доктор физико-математических наук,  
профессор, главный научный сотрудник  
ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю.  
Шмидта РАН»  
**Онищенко Олег Григорьевич**

Ведущая организация: **ФГБУН «Объединенный институт  
высоких температур РАН».**

Защита состоится «22» декабря 2016 года в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 при Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18, ауд. мех. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 35 и на сайте <http://kpfu.ru>.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 35, диссертационный совет Д 212.081.11.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физ.-мат. наук, доцент



А.А. Саченков

## Общая характеристика работы

В диссертации проведено теоретическое исследование особенностей формирования и распространения магнитогазодинамических структур в изоэнтропически неустойчивой тепловыделяющей плазме.

**Актуальность.** Процессы, происходящие в плазме, находящейся в магнитном поле, вызывают активный интерес в связи с большим количеством фундаментальных и прикладных приложений. Среда такого типа естественным образом возникает в межзвездном пространстве и звездных атмосферах, а также являются рабочими средами перспективных образцов термоядерных реакторов, в которых удержание плазмы осуществляется магнитным полем. Структура и свойства газодинамических возмущений в проводящей плазме в присутствии магнитного поля, описываемые системой магнитогазодинамических (МГД) уравнений, подробно исследованы. В таких средах возможно распространение трёх типов волн: альфвеновских, быстрых и медленных МГД-волн (магнитоакустических волн).

В последние два десятилетия, в связи с развитием экспериментальной и вычислительной техники, появилось много наблюдений МГД - возмущений, распространяющихся в разных областях солнечной атмосферы (Keiling, Lee, Nakariakov 2016; DeMoortel, Nakariakov 2012, Ballai 2006). В частности, короткие цуги медленных МГД волн были обнаружены в подножиях корональных петель, в корональных дырах, включая более плотные и холодные области корональных дыр (полярные перья), и протуберанцах. Быстрые квазипериодические МГД волны также обнаружены в открытых магнитных структурах солнечной атмосферы и в корональных петлях. В солнечном ветре были обнаружены цуги солитонообразных МГД волн и отдельные гигантские уединенные волны сжатия, часто распространяющиеся длительное время без изменения скорости и формы в нижних слоях короны. Параметры этих структур, причины появления и быстрого исчезновения являются предметом активного обсуждения, но пока теория этих явлений в стадии развития.

Известно, что наличие источника тепловыделения в среде может сопровождаться тепловыми неустойчивостями разного типа, включая изоэнтропическую (акустическую) неустойчивость. Как показано в работах (Heyvaerts 1974, Nakariakov, Mendoza-Briceño, Ibáñez 2000, Chin, Verwichte, Rowlands, Nakariakov 2010), изоэнтропическая неустойчивость в проводящей плазме в присутствии магнитного поля приводит к усилению быстрых и медленных МГД - возмущений, но не влияет на устойчивость альфвеновских волн. Однако до сих пор в изоэнтропически неустойчивой тепловыделяющей плазме не проведены подробные теоретические исследования особенностей распространения линейных быстрых и медленных МГД волн с учетом дисперсии фазовых и групповых скоростей (возникающей в результате наличия в среде неадиабатических процессов), анизотропии коэффициентов усиления волн разного типа и их существенной зависимости от плазменного параметра  $\beta$  (отношения газодинамического давления к магнитному давлению). Тем более не были проведены исследования формируемых в результате изоэнтропической неустойчивости нелинейных МГД структур с учетом новых вязкостно-

дисперсионных свойств тепловыделяющей плазмы. Нелинейные МГД - структуры в солнечной атмосфере исследовались только с использованием моделей, справедливых в ограниченных частях спектра, либо в частном случае чисто акустических возмущений.

Фундаментальное значение рассматриваемые в диссертации задачи приобретают, также, в связи с нерешенной проблемой аномального нагрева короны Солнца и звезд, большинство из которых обладает горячими атмосферами, имеющими температуру, на 2-3 порядка превышающую температуру поверхности. Одной из актуальных моделей нагрева короны на данный момент является модель переноса энергии альфвеновскими волнами из нижних плотных слоев атмосферы солнца. В отличие от быстрых и медленных МГД волн, альфвеновские волны способны преодолевать большие расстояния, поскольку не являются сжимаемыми и не образуют резкого ударного фронта в слабом нелинейном приближении. Альфвеновские волны в солнечной короне впервые были зарегистрированы сравнительно недавно (Tomczyk et. al. 2007). Обнаруженные волны были слишком слабы, чтобы обеспечить нагрев короны до нужных температур. Лишь в 2011 году были обнаружены волны гораздо большей амплитуды (McIntosh et al. 2011), достаточной для нагрева короны и ускорения солнечного ветра. Природа возникновения альфвеновских волн большой амплитуды в нижних слоях солнечной атмосферы пока не выяснена.

В связи с перечисленными проблемами тема и цель диссертации являются весьма **актуальными**.

**Целью диссертации** является теоретическое исследование особенностей распространения и усиления МГД-волн, а также условий формирования нелинейных МГД-структур, включая автоволновые, их свойств в изоэнтропически неустойчивой тепловыделяющей плазме в постоянном магнитном поле.

В соответствии с поставленной целью определены **основные задачи диссертации**

1. На основе линеаризованной системы МГД уравнений полностью и частично проводящей плазмы в постоянном магнитном поле с обобщенной функцией тепловых потерь исследовать особенности распространения и усиления линейных магнитогазодинамических возмущений.

2. На основе имеющихся современных моделей нагрева и охлаждения солнечной атмосферы и межзвездной среды построить обобщенные функции тепловых потерь и определить температурные области, где возможна изоэнтропическая неустойчивость.

3. Получить и решить системы укороченных уравнений, описывающих процессы трехволновых взаимодействий сильной продольной МГД-волны (акустической волны) с альфвеновскими волнами в условиях изоэнтропической неустойчивости.

4. Получить и решить нестационарные нелинейные уравнения, описывающие эволюцию плоских слабых ударных МГД-волн и малых быстрых и медленных МГД-возмущений конечной амплитуды и произвольного спектра.

5. На основе полной одномерной системы МГД уравнений полностью проводящей плазмы в постоянном магнитном поле с обобщенной функцией тепловых потерь провести численное моделирование эволюции слабых ударных волн и сравнить результаты с решениями нелинейных уравнений.

**Новизной** обладают следующие результаты

1. Найденные в явном виде выражения для фазовых и групповых скоростей быстрых и медленных МГД-волн в тепловыделяющей плазме. Результаты анализа диаграмм Фридрихса для фазовых и групповых скоростей МГД-волн с учетом акустической дисперсии при разных значениях параметра бета плазмы.

2. Инкремент/декремент быстрых и медленных МГД-волн в идеальной полностью проводящей тепловыделяющей плазме, определяющийся видом и знаком коэффициента второй вязкости тепловыделяющей среды, но в отличие от случая акустических волн, имеющий сильно анизотропный вид, зависящий от частоты возмущения и величины внешнего магнитного поля. Условия усиления и инкременты усиления МГД-волн в изоэнтропически неустойчивой среде при учете конечной проводимости.

3. Системы укороченных уравнений, описывающие распад сильной акустической волны на альфвеновские волны в изоэнтропически неустойчивой частично проводящей плазме. Условия усиления и генерации альфвеновских волн, вид инкремента нарастания, порог параметрической генерации.

4. Нелинейное МГД - уравнение, описывающее эволюцию быстрых или медленных МГД - волн в тепловыделяющей плазме с точностью до величин второго порядка малости в приближении слабой дисперсии. Низкочастотные коэффициенты нелинейности, зависящие от типа волны, угла распространения волн, величины магнитного поля и свойств источника тепловыделения. Форма и параметры быстрых и медленных автоволновых МГД - импульсов, являющихся в условиях магнитоакустической неустойчивости автомодельным решением этого уравнения.

5. Условие неустойчивости слабых ударных МГД – волн, найденное с помощью решения полученного нелинейного уравнения. Показанный с использованием численного моделирования одномерной системы МГД уравнений распад неустойчивой слабой ударной МГД-волны в изоэнтропически неустойчивой плазме в магнитном поле на последовательность автоволновых МГД-импульсов.

**Научная и практическая ценность** проведенных в диссертации исследований заключается в том, что их результаты являются существенным вкладом в развитие теории магнитной газодинамики тепловыделяющей плазмы и могут быть использованы при диагностировании и прогнозировании распространения волн в МГД-средах технического и природного происхождения, включая термоядерные реакторы, атмосферы звезд и межзвездную среду.

**Достоверность** полученных научных результатов обеспечена применением строгих постановок задач и корректных математических моделей, использованием обоснованных аналитических методов и апробированных

численных методов, общепринятых в магнитной газодинамике, отсутствием противоречий между полученными аналитическими и численными решениями, а также качественным согласием полученных в диссертации результатов с имеющимися в литературе результатами теоретических исследований других авторов и экспериментальными данными.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Аналитический вид низкочастотного и высокочастотного инкремента быстрой и медленной МГД-волн через коэффициент второй вязкости, зависимости высокочастотных и низкочастотных инкрементов от параметра бета, угла распространения и свойств обобщенной функции тепловых потерь. Области с изоэнтропической неустойчивостью, определенные с использованием современных моделей нагрева и охлаждения солнечной короны и межзвездной среды.

2. Аналитический вид низкочастотной скорости быстрой и медленной МГД-волн в тепловыделяющей плазменной среде. Диаграммы Фридрихса для фазовой и групповой скоростей, построенные с учетом дисперсии скорости звука в тепловыделяющей среде в качественно разных областях параметра  $\beta$ .

3. Системы укороченных уравнений, описывающих параметрическое взаимодействие сильной акустической волны с альфвеновскими волнами в тепловыделяющей плазменной среде с конечной проводимостью. Условие усиления и аналитический вид инкремента нарастания альфвеновской волны в результате параметрического взаимодействия с акустической волной в изоэнтропически неустойчивой плазменной среде. Пороговое условие генерации альфвеновских волн.

4. Нелинейное уравнение для быстрых или медленных МГД-волн и его решения в виде бегущих стационарных волн, включая автоволновой МГД-импульс и ударную волну с повышением и понижением плотности за фронтом. Аналитические зависимости низкочастотных коэффициентов нелинейности, амплитуды и скорости импульса от типа волны, свойств обобщенного источника тепловыделения, параметра  $\beta$  и угла распространения.

5. Условие неустойчивости слабой ударной МГД-волны в тепловыделяющей среде. Результаты численного моделирования распада слабой ударной волны в плазменной среде с постоянным магнитным полем на последовательность автоволновых МГД-импульсов, включая восстановление формы импульсов после столкновения.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, Самарского филиала Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Курдюмовских чтениях (Тверь 2010, 2011, 2014), школах-конференциях «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов 2010, 2013), школах-семинарах «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2010, 2012, 2016), конференциях-конкурсах молодых физиков (Москва 2010-2012, 2014), 17, 18, 20-23 International Congress on Sound and Vibration (Каир, 2010, Рио-де-Жанейро, 2011, Бангкок, 2013, Пекин, 2014, Флоренция, 2015, Афины, 2016), на

24, 25 и 27 сессиях РАО (Москва, 2011, Таганрог, 2012, Санкт-Петербург, 2014), 6, 7 Forum Acusticum (Ольборг, 2011, Краков, 2014), 9, 10 European Fluid Mechanics Conference (Рим, 2012, Копенгаген, 2014), 20, 21 International Shock Interaction Symposium (Стокгольм, 2012, Рига, 2014), 21, 22 International Congress on Acoustics (Монреаль, 2013, Буэнос-Айрес, 2016), 12 International Workshop on magnetoplasma aerodynamics (Moscow, 2013), II Международной конференции "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность" (Москва, 2014), конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014) (Алушта, 2014), 4th Radio Sun Workshop and Summer School (Иркутск, 2015), II Российской конференции по магнитной гидродинамике (Пермь, 2015), III Southern African Solar Energy Conference, (Скукуза, 2015), 10, 11 конференциях "Физика плазмы в солнечной системе" (Москва, 2015, 2016), 20<sup>th</sup> International Symposium on Nonlinear Acoustics (Лион, 2015) и других конференциях.

**Основные публикации.** По материалам диссертации опубликовано 66 печатных работ, в том числе 13 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 53 труда Международных и Всероссийских конференций, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Личный вклад соискателя.** Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, либо при его определяющем личном участии. Из работ в соавторстве на защиту выносятся результаты, в получении которых автор принимал непосредственное участие. Результаты, вошедшие в диссертацию, были отмечены: стипендией Президента РФ для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики 2013-2015 г., дипломом победителя конкурса научных работ (Премия Физического института им. П.Н. Лебедева РАН за 2012 г.), стипендией Президента Российской Федерации студентам высших учебных заведений Российской Федерации на 2011/2012 гг., дипломом лауреата премии Минобрнауки России для поддержки талантливой молодежи по итогам проекта «Образование» в 2011, 2012 гг., дипломом за победу в конкурсе фонда Дмитрия Зимина «Династия» за 2012 г. и др.

#### **Связь с государственными программами и НИР.**

Работы по теме диссертации выполнялись в соответствии с планами фундаментальных научно-исследовательских работ по грантам и программам: грант АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)», проект № 2.1.1/309; гранты ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. № НК-410П, 14.B37.21.0767, государственное задание Минобрнауки РФ № 2.560.2011, 3.608.2014/К 3.1451.2014/К, грант РФФИ 14-02-97030 р\_поволжье\_a, НИР СФ ФИАН ГР 114091840046, программа повышения конкурентоспособности Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)» на 2013–2020 гг., соглашения № СИ1/10-2014, № СИ1/10-2015.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 188 страниц, включая 41 рисунок, 10 таблиц, список литературы содержит 181 наименование.

### **Основное содержание работы**

Во **введении** описано состояние рассматриваемой проблемы и обоснована актуальность темы диссертации. Сформулированы цели и задачи исследования, новизна полученных результатов и защищаемые положения. Приведено краткое содержание работы по главам диссертации.

**В первой главе** рассматриваются особенности распространения линейных МГД-волн, включая их дисперсию и усиление, в идеальной полностью проводящей плазме, процессы тепловыделения и охлаждения в которой моделируются обобщенной функцией тепловых потерь и получено условие усиления рассматриваемых волн при учете конечной величины электропроводности.

**В разделе 1.1** кратко описаны свойства акустических волн достаточно малой амплитуды при наличии обобщенного источника тепловыделения.

**В разделе 1.2** исследуются дисперсионные свойства МГД-волн в плазме с обобщенным источником тепловыделения.

**В подразделе 1.2.1** описывается исходная система МГД уравнений, описывающая динамику МГД-волн в идеально проводящей одножидкостной плазме. Получено уравнение, описывающее распространение линейных МГД волн в тепловыделяющей полностью проводящей плазме.

**В подразделе 1.2.2** описываются дисперсионные свойства альфвеновских волн в идеально проводящей плазме с обобщенным источником тепловыделения. Найдены фазовая и групповая скорости альфвеновских волн.

**В подразделе 1.2.3** описываются дисперсионные свойства быстрых и медленных МГД-волн в идеально проводящей плазме с обобщенным источником тепловыделения. В явном виде найдены выражения для фазовых скоростей быстрых и медленных МГД-волн в тепловыделяющей плазме через дисперсию скорости звука. Определены в явном виде скорости низкочастотных и высокочастотных быстрых и медленных МГД-волн. Показано, что высокочастотные фазовые скорости совпадают по виду с фазовыми скоростями быстрой и медленной МГД-волн в равновесной плазме, а низкочастотные существенно зависят от свойств обобщенного источника тепловыделения (зависимостей мощностей нагрева/охлаждения от температуры и плотности среды). Построены и проанализированы поляры фазовых скоростей магнитогазодинамических волн (Рисунок 1) с учетом акустической дисперсии в качественно разных областях параметра  $\beta$ . Переход от светлого тона к темному на рисунке 1 соответствует переходу от низких частот ( $\omega \ll 1/\tau_0$ ) к высоким частотам ( $\omega \gg 1/\tau_0$ ),  $\tau_0$  - характерное время нагрева/охлаждения среды.

**В подразделе 1.2.4** получена групповая скорость акустических возмущений в тепловыделяющем газе. Показано, что она совпадает по форме с видом групповой скорости, полученной ранее для релаксирующей среды. Далее



получена групповая скорость быстрых и медленных магнитогазодинамических возмущений в тепловыделяющей плазме.

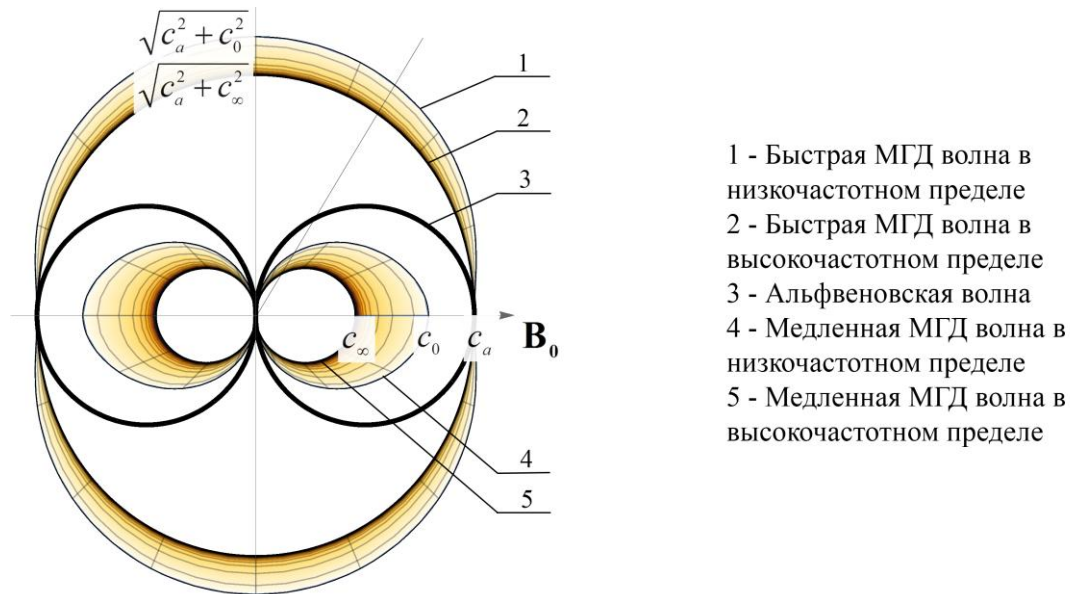


Рисунок 1. Полярная диаграмма фазовой скорости в среде, где низкочастотные возмущения распространяются быстрее высокочастотных при значениях  $\beta < 2/\gamma_0$ ,  $\gamma_0$  - низкочастотный показатель адиабаты МГД-волны.

Полученное выражение при отсутствии обобщенной функции теплопотерь сводится к классическому выражению для МГД-волн в равновесной среде, а в случае отсутствия магнитного поля - к выражению для групповой скорости акустических волн. Построены и проанализированы поляры групповых скоростей (диаграммы Фридрихса) МГД-волн с учетом акустической дисперсии в качественно разных областях параметра  $\beta$ .

В подразделе 1.2.5 показано, что инкремент/декремент МГД-волн в идеальной полностью проводящей тепловыделяющей плазме определяется видом и знаком коэффициента второй вязкости тепловыделяющей среды, но в отличие от случая акустических волн, имеет сильно анизотропный вид, зависящий от частоты возмущения и величины внешнего магнитного поля. Коэффициент второй вязкости становится отрицательным при выполнении условия изоэнтропической неустойчивости. Показано, что инкременты нарастания магнитогазодинамических возмущений в высокочастотном диапазоне не зависят от частоты возмущения, инкременты нарастания магнитогазодинамических возмущений в низкочастотном диапазоне зависят от частоты возмущения квадратично. Быстрые МГД-волны всегда усиливаются сильнее медленных волн в среде с преобладающим газовым давлением ( $\beta > 2/\gamma$ ), где  $\gamma$  - показатель адиабаты. И наоборот, в среде, где преобладает магнитное давление ( $\beta < 2/\gamma$ ), в большей степени усиливаются медленные МГД-волны.

В разделе 1.3 исследуется возможность реализации условий изоэнтропической неустойчивости на примере двух типов сред: солнечной атмосферы и фотодиссоциативных областей межзвездной среды.

**В подразделе 1.3.1** найдены условия изоэнтропической неустойчивости в фотодиссоциативных областях межзвездной среды. Определены характерные значения коэффициента усиления и времени нагрева.

**В подразделе 1.3.2** найдены температурные области изоэнтропической неустойчивости солнечной атмосферы и рассчитаны инкременты для пяти наиболее часто рассматриваемых сценариев нагрева и функции охлаждения, рассчитанной на основе данных базы CHIANTI v7. Проведено сравнение с предыдущими исследованиями изоэнтропически неустойчивых областей, основанных на аналитическом представлении функции охлаждения.

**В разделе 1.4** получено уравнение, описывающее распространение быстрых и медленных линейных МГД-волн в тепловыделяющей плазме с конечной проводимостью. Найдены условия усиления и инкременты усиления МГД-волн при учете конечной проводимости.

**Во второй главе** рассмотрена возможность и впервые детально проанализированы особенности параметрического усиления альфвеновских волн за счет энергии неустойчивых акустических волн. Рассмотрена нелинейная стадия эволюции МГД-волн, распространяющихся под произвольным углом к вектору внешнего магнитного поля в изоэнтропически неустойчивой тепловыделяющей плазме. Впервые показана неустойчивость слабых ударных МГД-волн и возможность формирования автоволнового магнитогазодинамического импульса с параметрами, определяемыми свойствами изоэнтропически неустойчивой плазменной среды, величиной магнитного поля, а также типом волны (медленная или быстрая) и углом её распространения.

**В разделе 2.1** исследуется возможность и проводится анализ особенности параметрического усиления альфвеновских волн за счет энергии неустойчивых акустических волн.

**В подразделе 2.1.1** приведен краткий обзор теоретических работ по параметрическому взаимодействию МГД - волн.

**В подразделе 2.1.2** получены укороченные уравнения, описывающие трехволновые резонансные взаимодействия МГД - волн, распространяющихся вдоль направления магнитного поля в тепловыделяющей конечно проводящей МГД среде с тепловыделением, моделируемым функцией тепловых потерь. С использованием приближения заданного усиливающегося акустического поля найдены аналитические решения этих уравнений в нестационарном и стационарном случаях.

**В подразделе 2.1.3** найдены условия параметрического усиления альфвеновской волны в результате распада акустической волны накачки в тепловыделяющей МГД среде с тепловыделением, моделируемым функцией тепловых потерь. Показано, что рассмотренное параметрическое усиление в изоэнтропически неустойчивой среде является беспороговым и с экспоненциальным инкрементом  $\sim \exp[AC_{20} \exp |c_{Snd} \alpha_{Snd} \cdot t| / c_{Snd} \alpha_{Snd}]$ , где  $\tilde{A}$  - коэффициент нелинейного взаимодействия волн,  $C_{20}$  - амплитуда акустической волны накачки,  $\alpha_{Snd}, c_{Snd}$  - инкремент усиления и скорость акустических волн.

Определено время начала параметрического усиления, зависящее от коэффициента акустического усиления и мощности акустической волны накачки. В предельном случае отсутствия изоэнтропической неустойчивости инкремент становится линейным и появляется порог неустойчивости, что соответствует результатам для равновесных сред.

**В подразделе 2.1.4** найдены условия параметрической генерации альфвеновских волн, бегущих навстречу друг другу, в результате распада акустической волны накачки в неустойчивой МГД-среде с тепловыделением, моделируемым функцией тепловых потерь. Найдено пороговое условие на амплитуду волны накачки  $(A/c_a)C_{20}(1 - e^{-\alpha_{Snd}L})/\alpha_{Snd} = \pi/2 + \pi \cdot n, n \in Z$ , где  $c_a$  - скорость альфвеновских волн,  $L$  - пространственный размер среды. Показано, что пороговая амплитуда накачки в усиливающем слое достаточной толщины уменьшается экспоненциально по сравнению с известным значением в равновесной акустически устойчивой среде распространения.

**В подразделе 2.1.5** описаны области, в которых возможно параметрическое усиление альфвеновских волн за счет взаимодействия с акустическими волнами.

**В разделе 2.2** исследуется нелинейная стадия эволюции МГД-волн, распространяющихся под произвольным углом к вектору внешнего магнитного поля, в изоэнтропически неустойчивой тепловыделяющей плазме.

**В подразделе 2.2.1** описана методика вывода и получено нелинейное МГД-уравнение, описывающее эволюцию быстрых или медленных МГД-волн в тепловыделяющей плазме с точностью до величин второго порядка малости в приближении слабой дисперсии.

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{\xi}} \left( \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \tilde{\tau}} + \frac{\Psi_{\infty}}{2} \frac{\partial \tilde{\rho}^2}{\partial \tilde{\xi}} - \mu_{\infty} \frac{\partial^2 \tilde{\rho}}{\partial \tilde{\xi}^2} \right) - \frac{C_{v0}}{C_{v\infty}} \left( \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \tilde{\tau}} + \frac{m}{2} \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \tilde{\xi}} + \frac{\Psi_0}{2} \frac{\partial \tilde{\rho}^2}{\partial \tilde{\xi}} - \mu_0 \frac{\partial^2 \tilde{\rho}}{\partial \tilde{\xi}^2} \right) = 0 \quad (1)$$

где  $C_{v0}, C_{v\infty}, \Psi_{\infty}, \Psi_0$  и  $\mu_{\infty}, \mu_0$  - высокочастотные и низкочастотные теплоёмкости при постоянном объеме, коэффициенты газодинамической нелинейности (зависящие от типа волны, угла распространения волн, величины магнитного поля и свойств источника тепловыделения) и диссипативные коэффициенты,  $m$  - коэффициент дисперсии,  $\tilde{\rho}$  - безразмерное возмущение плотности,  $\tilde{\xi}$  и  $\tilde{\tau}$  - безразмерная пространственная координата в системе отсчета, движущейся со скоростью МГД-волн, и безразмерное время.

**В подразделе 2.2.2** определена форма и параметры быстрых и медленных автоволновых МГД-импульсов, являющихся в условиях изоэнтропической неустойчивости автомодельным решением этого уравнения.

**В третьей главе** описаны результаты численного моделирования эволюции слабых ударных волн, полученные двумя способами: с использованием нелинейного МГД - уравнения и с использованием полной исходной системы уравнений магнитной газодинамики для сред с обобщённой функцией тепловых потерь.

**В разделе 3.1** описана расчетная модель для численного моделирования, а также краткое описание методики численного решения полной системы уравнений магнитной гидродинамики идеально проводящей тепловыделяющей

плазмы. Моделирование проводилось в Лагранжевых массовых координатах с использованием полностью консервативной неявной разностной схемы. Для «размытия» фронта ударноволновых решений применялась линейная искусственная вязкость.

В разделе 3.2 рассмотрена эволюция МГД-возмущения типа «ступеньки» в изоэнтропически неустойчивой среде на основе нелинейного магнитогазодинамического уравнения. Показано, что ступенька с амплитудой, меньшей критического значения, распадается на последовательность автоволновых импульсов. Амплитуда импульсов сильно зависит от типа МГД-волны, угла распространения и величины параметра  $\beta$  (Рисунок 2).

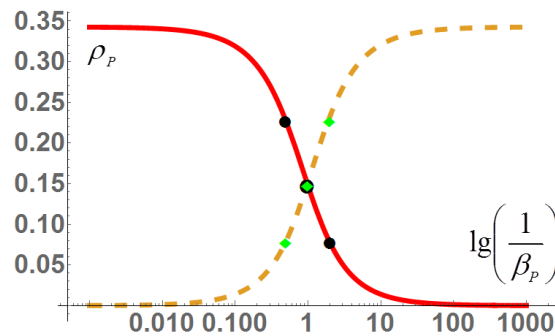


Рисунок 2. Зависимость амплитуды быстрых (сплошная линия) и медленных (пунктирная линия) магнитогазодинамических автоволновых импульсов от параметра бета при распространении под углом  $45^\circ$  к вектору магнитного поля

Показано, что для медленных МГД-волн происходит распад на автоволновые импульсы сжатия и отрицательные импульсы магнитного поля. Для быстрых волн — на импульсы сжатия и положительные импульсы магнитного поля (Рисунок 3).

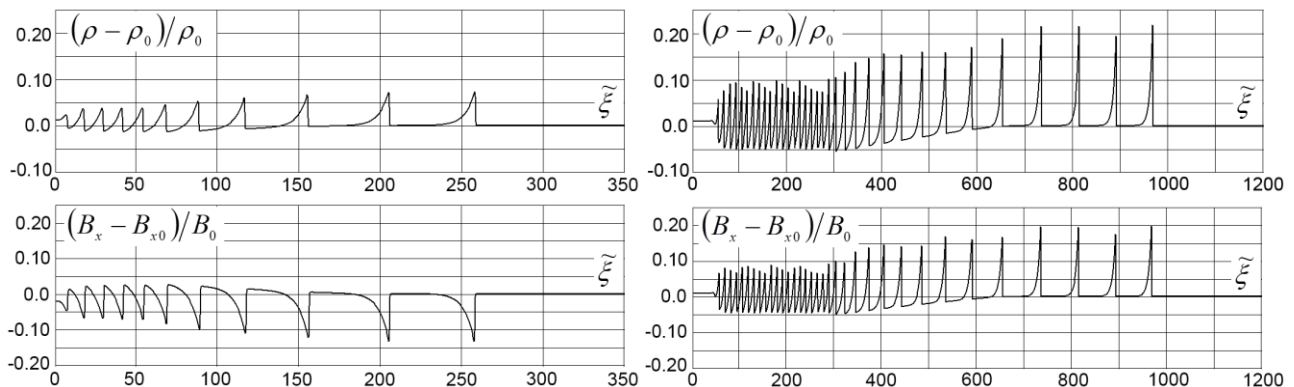


Рисунок 3. Распад исходного возмущения медленной (слева) и быстрой (справа) магнитогазодинамической волны в виде «ступеньки» на последовательность автоволновых импульсов при  $\beta = 2$ .

В разделе 3.3 на основе полной одномерной системы магнитной газодинамики рассмотрена эволюция быстрой ударной МГД - волны, распространяющейся поперёк магнитного поля в изоэнтропически неустойчивой среде. Получен распад слабой ударной МГД - волны на последовательность автоволновых импульсов. Показано количественное и качественное совпадение результатов численного счета с результатами аналитического и численного решения нелинейного МГД уравнения (Рисунок

4). Показано также, что автоволновые импульсы полностью восстанавливают форму после соударения.

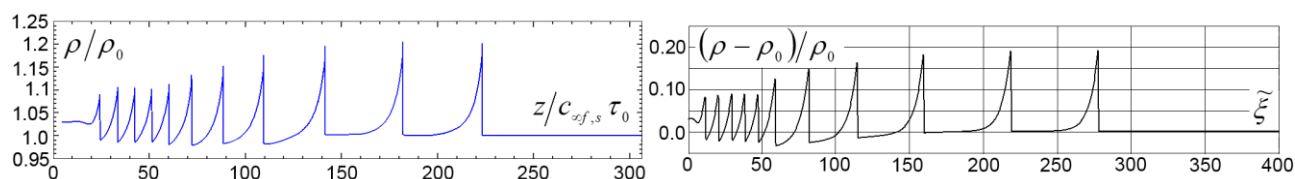


Рисунок 4. Распад быстрой МГД волны в виде «ступеньки» на последовательность автоволновых импульсов при  $\beta = 2$ , при распространении поперек магнитного поля, рассчитанный с помощью численного решения полной системы уравнений магнитной газодинамики (слева), и решения нелинейного уравнения (1) (справа)

В конце каждой главы, кратко описаны основные результаты, представленные в данной главе.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

1. Получено уравнение, описывающее распространение линейных МГД-волн в тепловыделяющей плазме. Определены выражения для фазовых и групповых скоростей быстрой и медленной МГД-волн. Показано, что в высокочастотном пределе выражения для скорости быстрой и медленной МГД-волн совпадают с выражениями для равновесных сред, а в низкочастотном пределе скорости определяются преимущественно неадиабатическими процессами, протекающими в среде. Для демонстрации анизотропии МГД-волн построены полярные диаграммы (диаграммы Фридрихса) фазовой и групповой скорости, показывающие качественное отличие поведения спектрального состава МГД-волн от случая равновесных сред.

2. Найден аналитический вид инкремента усиления быстрой и медленной МГД-волн с помощью коэффициента второй вязкости сред с обобщенным источником тепловыделения. Показано, что в отсутствие диссипативных процессов, условием усиления будет являться отрицательность коэффициента второй вязкости (условие изоэнтропической неустойчивости). Описана зависимость инкремента усиления от частоты, направления распространения и величины внешнего магнитного поля. Показано, что в средах, где газодинамическое давление преобладает над магнитным давлением, в большей степени будут усиливаться быстрые МГД-волны, а в противоположном случае, наоборот сильнее усиливаются медленные МГД-волны. Определены условия усиления МГД-волн в тепловыделяющей плазме с конечной электрической проводимостью. Показана возможность реализации изоэнтропической неустойчивости в солнечной атмосфере и фотодиссоциативных областях межзвездной среды.

3. Получены и решены системы укороченных дифференциальных уравнений, описывающие процесс нелинейного взаимодействия неустойчивой акустической волны, с двумя со- и противоположно- направленными альфвеновскими волнами или с одной сонаправленной альфвеновской волной в тепловыделяющей плазме с учетом конечной проводимости. Показано, что параметрическое усиление в изоэнтропически неустойчивой среде является

беспороговым и с экспоненциальным, а не линейным инкрементом. Определены условия параметрической генерации альфвеновских волн. Указаны области солнечной атмосферы, в которых возможно параметрическое усиление альфвеновских волн за счет энергии неустойчивых акустических волн.

4. Получено нелинейное МГД уравнение, описывающее эволюцию быстрых или медленных МГД-волн в приближении слабой дисперсии с точностью до величин второго порядка малости. Определен низкочастотный коэффициент нелинейности. Показано, что низкочастотный коэффициент нелинейности, в отличие от высокочастотного коэффициента, в первую очередь определяется протекающими в среде неадиабатическими процессами. Описаны возможные решения нелинейного уравнения в виде стационарных бегущих волн, таких как ударные волны с понижением и повышением плотности за фронтом и автоволновой импульс, а также условия их реализации. Найдены зависимости низкочастотных коэффициентов нелинейности, амплитуды и скорости автоволнового импульса от типа волны, параметра  $\beta$  и направления распространения по отношению к направлению вектора магнитного поля.

5. Создана расчетная МГД модель тепловыделяющей среды. Проведена проверка эволюционной устойчивости аналитических решений нелинейного МГД уравнения с помощью его численного решения. Определено условие неустойчивости слабой МГД ударной волны в изоэнтропически неустойчивой среде. Представлены результаты численного моделирования процесса распада неустойчивых быстрых и медленных МГД-возмущений типа «ступенька» на последовательность автоволновых импульсов при различных углах распространения волн к вектору внешнего магнитного поля. Подтверждены аналитически полученные зависимости амплитуды автоволновых импульсов от типа волны, направления распространения и величины параметра  $\beta$ . На примере распространения быстрой МГД-волны поперек вектора магнитного поля проведено сравнение результатов численных моделирований нелинейного МГД уравнения и полной системы одномерных МГД уравнений, описывающей тепловыделяющую идеально проводящую плазму. Результаты сравнения подтвердили, что нелинейное МГД уравнение адекватно описывает эволюцию и параметры слабых ударных МГД-волн, а также их распад на последовательность автоволновых импульсов одинаковой амплитуды. С помощью численного решения полной системы МГД уравнений показано восстановление формы автоволновых импульсов после их столкновения.

#### **Публикации по теме диссертации**

##### **В журналах из перечня ВАК:**

1. Molevich, N.E. Traveling self-sustained structures in interstellar clouds with the isentropic instability [текст] / N.E. Molevich, D.I. Zavershinsky, R.N. Galimov, V.G. Makaryan // *Astrophysics and Space Science*. – 2011. – V. 334. - I. 1. P. 35-44.

2. Завершинский, Д.И. Взаимодействие ударных волн с областью неравновесности в колебательно-возбужденном газе [текст] / Д.И. Завершинский, В.Г. Макарян, Д.П. Порфирьев // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки*. – 2012. – Т. 3.– № 28.– С. 203-207.

3. Завершинский, Д.И. Дисперсия магнитоакустических волн в средах с тепловой неустойчивостью [текст] / Р.Н. Галимов, Д.И. Завершинский, В.Г. Макарян, Н.Е. Молевич // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – Т. 3 - № 34. – С. 147-153.

4. Молевич, Н.Е. Профили ударных волн в релаксирующем газе с внешним источником энергии [текст] / Д.А. Анчиков, Р.Н. Галимов, Д.И. Завершинский, В.Г. Макарян, Н.Е. Молевич // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – Т. 3 – № 34. – С. 229-233.

5. Завершинский, Д.И. Параметрическое взаимодействие сонаправленных магнитоакустической и альфвеновской волн в условиях магнитоакустической неустойчивости [текст] / Д.И. Завершинский, Н.Е. Молевич // Компьютерная оптика – 2013 – Т. 37. – N. 4. – С. 410-414.

6. Завершинский, Д.И. Магнитоакустический автоволновой импульс в тепловыделяющей ионизированной газовой среде [текст] / Д.И. Завершинский, Н.Е. Молевич // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – № 15. – С. 18-25.

7. Завершинский, Д.И. Численное моделирование процесса генерации серии автоволновых импульсов в тепловыделяющей плазменной среде [текст] / Д.И. Завершинский, Н.Е. Молевич, Р.Н. Галимов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т.16. - № 4 (2). – С. 436-440.

8. Завершинский Д.И. Усиление магнитоакустических волн в оптически тонкой плазменной среде с тепловой неустойчивостью [текст] / Д.И. Завершинский, Н.Е. Молевич // Компьютерная оптика – 2014. – Т.38. – № 4 – С. 619-622.

9. Завершинский, Д.И. Усиление альфвеновских волн в результате нелинейного взаимодействия с магнитоакустической волной в акустически активной проводящей среде [текст] / Д.И. Завершинский, Н.Е. Молевич // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т.40. – Вып. 16– С. 50-57.

10. Zavershinskiy, D.I. Structure of Acoustic Perturbations in Heat-Releasing Medium [текст] / D.I. Zavershinskii, N.E. Molevich, D.S. Ryashchikov // Procedia Engineering. – 2015. – V. 106. – P. 363-367.

11. Zavershinskiy, D.I. Parametrical amplification of Alfvén waves in heat-releasing ionized media with magnetoacoustic instability [текст] / D.I. Zavershinskiy, N.E. Molevich // Astrophysics and Space Science. – 2015. – V. 358. – id. 22.–P.1-13.

12. Ryashchikov, D.S. Influence of thermal conduction on properties of MHD waves in thermally unstable plasma [текст] / N.E. Molevich, D.S. Ryashchikov, D.I. Zavershinskii // Magnetohydrodynamics. – 2016. – Т. 52. – С. 199-208.

13. Zavershinskiy, D.I. Investigation of the MHD-wave dynamics in thermally unstable plasma [текст] / N.E. Molevich, D.I. Zavershinskiy, D.S. Ryashchikov // Magnetohydrodynamics. – 2016. – Т. 52 – С. 191-198.

#### **Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

14. Завершинский Д.И., Молевич Н.Е. “Исследование эволюции и взаимодействия нелинейных акустических, магнитоакустических и альфвеновских волн”. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661185 от 29 ноября 2013 г.



**В других изданиях:**

15. Molevich, N. E. Self-sustaining hydrodynamical structures and shock – wave disintegration in nonequilibrium media with heat release [Электронный ресурс] // N. E. Molevich, R. N. Galimov, V.G. Makaryan, D. I. Zavershinsky // Proc. 9 Euromech Fluid Mechanics Conference (EFMC9), Roma, Italy. – 2012. -1 CD. - 0645\_VO5.
16. Zavershinsky, D.I. The periodic sequence of shock waves in medium with thermal instability [Электронный ресурс] / D.I. Zavershinsky, N. E. Molevich // Proc. 20th International Shock Interaction Symposium, Stockholm, Sweden, 2012. August 20 – 24. – 2012. – 1CD.
17. Молевич, Н. Е. Нелинейные МГД-структуры в областях солнечной атмосферы с магнитоакустической неустойчивостью [текст] / Н. Е. Молевич, Д. И. Завершинский, А. А. Кренц, А. В. Пахомов, Д. С. Рящиков, В. Г. Макарян // 2-я Международная конференция "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность", 24-27.11.2014, г. Москва. – С. 250-255.
18. Molevich, N.E. Self-sustaining magneto-hydrodynamic structures in acoustically unstable media with heat release [текст] / N.E. Molevich, D.I. Zavershinskii, I.P. Zavershinskii, D.S. Ryashikov // Book of Abstracts, European Fluid Mechanics Conference 10, Denmark, Copenhagen, 15–18.09. 2014. - P.560.
19. Zavershinskiy, D.I. The formation of a magnetoacoustic self-sustained shock pulses in a thermally unstable medium release [Электронный ресурс] / D.I. Zavershinskiy, N.E. Molevich // Proc. 21st International Shock Interaction Symposium, Riga, Latvia, – 2014. August 3 – 8. – 2014. – 1CD.
20. Zavershinskiy, D.I. Nonlinear equation for magnetoacoustic waves in heat-releasing completely ionized plasma [текст] / D.I. Zavershinskiy, N.E. Molevich // The 4th Radio Sun Workshop and Summer School, Irkutsk, 8–12.06.2015. – С. 7.
21. Завершинский, Д.И. Исследование эволюции и взаимодействия МГД-волн в оптически тонкой космической плазме с изоэнтропической неустойчивостью [текст] / Д.И. Завершинский, Н.Е. Молевич, Д.С. Рящиков // Десятая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе". Москва, 16 – 20.02.2015. – С. 167.
22. Ryashchikov, D.S. Magnetoacoustic nonlinear waves in a heat-releasing plasma [текст] / D.S. Ryashchikov, N.E. Molevich, D. I. Zavershinskiy // AIP Conference Proceedings.– 2015. – V. 1685 – I. 1. – P.060002.
23. Zavershinskii, D.I. Wave-wave interaction between a powerful acoustic wave and linearly polarized alfvén waves in acoustically active plasma medium [текст] / N. E. Molevich, D. I. Zavershinskii, I. P. Zavershinskii // Proceedings of 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22) Florence, Italy. 12 – 16.07.2015. International Institute of Acoustics and Vibration V. 4. P. 2951-2955.
24. Zavershinskii, D.I. Evolution modelling of fast and slow magnetoacoustic waves in thermally unstable plasma [Электронный ресурс] / D.I. Zavershinskii, N.E. Molevich, I.P. Zavershinskii, S. Y. Pichugin, D.S. Ryashchikov // Proceedings of the 22th International Congress on Acoustics ICA 2016, Buenos Aires, Argentina. 5–9.09.2016. <http://www.ica2016.org.ar/ica2016proceedings/ica2016/ICA2016-0174.pdf>.